

밸브 후단 피팅에 따른 밸브 용량계수의 영향 평가

강승규* · 이원식** · 윤준용*** · 민경화****

Evaluation of the Effect on the Valve Flow Coefficient by Attached Fitting

Seung-Kyu Kang*, Won-Sik Lee**, Joon-Yong Yoon***, Kyung-Wha Min****

Key Words: Valve flow coefficient (밸브 용량계수), Piping geometry factor (배관 형상계수), Computational fluid dynamics (전산유체역학), Globe style control valve (글로브 타입 제어밸브)

ABSTRACT

This study was undertaken to verify the effect of flow coefficient when a globe control valve was attached by different type of fitting. The valve flow coefficient is usually determined by measuring the flow rate and the pressure drop with the connection of straight pipe through the valve. The effect of different fitting that is mounted on the downstream of the valve is studied. Four types of fittings and three distances between the valve and a downstream fitting are compared parametrically to investigate the effect on the flow coefficient of it. Measured flow coefficient and numerically predicted value by using computational fluid dynamics were compared in detail. It is concluded that the flow coefficient is reduced if the fitting is attached after a valve, but the effect of different type of fitting is not crucial.

1. 서 론

국내 밸브산업은 대표적인 수입역조의 산업으로서 국내 총 밸브 수요인 1조 3천억원 중에서 60% 정도인 7천억원 이상을 수입하고 있는 실정이다. 공정 프로세스에서 가장 중요한 밸브의 용량계수에 관한 연구는 낙후되어 있는 우리나라의 제어밸브 산업 기술 발전 및 관련 기술 발전의 촉매 역할을 할 수 있는 밸브의 근본 기술로서 매우 중요한 의미를 갖는다.

제어밸브를 공정 프로세스에 적용함에 있어 밸브의

고유 용량계수는 유체의 압력회복계수, 배관의 형상에 따른 배관 형상계수, 입·출구 압력차이의 비에 따른 계수, 밸브의 형식에 따른 스타일 계수와 유체 흐름 시 밸브에서의 레이놀즈수에 따른 레이놀즈 계수 등의 영향을 받는다. 실제 밸브가 설치되어 공정상에서 운전할 때, 즉 운전시의 밸브 용량계수는 이에 직접적인 영향을 미치는 제반 요인을 고려하여 밸브의 유량 성능을 확인하여야 한다. 그러나 기존의 유량 성능시험이 일반 밸브의 최대 정격 용량계수를 측정하는 것으로서 밸브의 형상, 개도에 따른 유량의 변화 및 밸브의 유량 성능에 영향을 미치는 연결 배관 피팅의 형상에 대한 기준은 현재 마련되어있지 않고, 그에 대한 연구도 거의 없는 실정이다^(1,2). 그러나 기존의 밸브 성능에 관한 연구들은 밸브 후단에 직관이 설치된 이상

* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 산업자원부 기술표준원
*** 한양대학교 기계공학과
**** (주) 키밸브기술
책임저자 E-mail : skkang@ihanyang.ac.kr

적인 경우의 유동에 해당한다⁽³⁻⁵⁾. 밸브 후단에 직관이 아닌 압력 손실을 유발하는 배관이 설치될 경우, 피팅에 의한 압력 손실로 인하여 밸브 용량계수 값이 영향을 받게 된다.

본 연구는 밸브 후단에 L, T, Y, +자형의 배관이 피팅 될 경우 피팅 설치에 의한 용량계수의 변화를 고찰하였다. 본 연구는 제어 밸브의 용량 계수를 대상으로 하였기 때문에 이와 관련되는 산업분야 특히 석유화학, 에너지 발전분야 등에서 많은 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론

2.1 유체유동 지배방정식

난류유동장 내의 유체유동은 다음과 같은 연속방정식 (continuity equation), 시간평균 운동량방정식 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 그리고 난류모델 방정식 (turbulence modeled equations)의 지배를 받는다⁽⁶⁾.

연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_j) = & -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \rho f_i \end{aligned} \quad (2)$$

시간 평균화된 N-S 방정식은 레이놀즈 응력이라고 하는 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 의 미지항을 추가적으로 포함하게 된다. 이 평균화된 N-S 방정식을 종결 (closure)시키기 위해 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 공학해석에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 표준 k-ε 난류모델을 사용한다. 이 모델은 속도와 길이 척도를 추정하기 위하여 난류운동에너지와 소산율의 수송을 지배하는 다음과 같은 k와 ε에 관한 두 개의 표준 미분방정식을 도입한다⁽⁷⁾. k-ε 난류모델 (standard k-ε turbulence model):

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = & \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 와점성계수 (kinematic eddy viscosity, ν_t)는 다음과 같이 정의되고,

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

이때 사용된 모델링 상수는 다음과 같다.

$$C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.2 밸브 용량계수

관로 안에 있는 밸브는 유체에 대하여 저항을 일으켜, Fig. 1에 나타내는 회복할 수 없는 압력 손실을 발생한다. 난류조건 하에서 이 압력 손실은, 속도 수두에 비례하여 다음 식에 따라 산출된다⁽⁶⁾.

$$\Delta p = \frac{\zeta \rho v^2}{2} \quad (6)$$

여기서 Δp 는 압력손실, ζ 는 압력 손실 계수, ρ 는 유체의 밀도, 그리고 v 는 관로 내의 평균 유속이다. 그런데 $Q = vA$ 이므로, $v = \frac{Q}{A}$ 이다. 여기서 Q 는 체적 유량이고 A 는 관로의 단면적이다. 따라서

$$Q = A \sqrt{\frac{2}{\zeta}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

$$A \sqrt{\frac{2}{\zeta}} = C \quad (8)$$

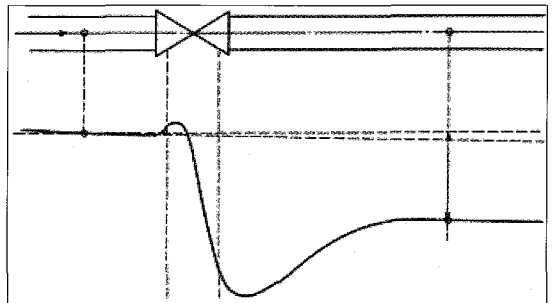


Fig. 1 Pressure variation of the flow through a valve

여기서 C 는 용량계수 (flow coefficient)이다. 따라서 밸브 용량계수를 구하는 일반식은 다음과 같다.

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (9)$$

실험을 통해 용량계수를 구할 경우 세 가지 차압영역에서 얻어진 값이 4% 오차범위 안에 있어야 한다⁽¹⁾. 만약 이 오차한계를 초과한다면 실험을 다시 반복하여야 한다. 여기서 얻어진 세 가지 실험값의 산술 평균값을 용량계수로 정한다.

2.3 배관 형상계수

배관 형상계수 (F_b)는 부속품이 없이 설치된 밸브에서의 용량계수에 대한 부속품이 추가된 밸브의 용량계수의 비 (比)이다. 부속품이 추가 될 경우 밸브 용량은 다음 식으로 계산된다⁽¹⁾.

$$Q = N_1 \cdot F_R \cdot F_b \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho/\rho_0}} \quad (10)$$

여기에서 N_1 은 수치 상수로서 차압 단위가 kPa, 용량 단위가 m^3/h 일 때 8.65×10^{-2} 이고, F_R 은 레이놀즈수 계수로서 난류영역에서 1.0이다. 그리고 ρ/ρ_0 는 상온의 물에서 1.0의 값을 갖는다.

3. 실험 및 시뮬레이션

3.1 연구방법

유동에 미치는 여러 가지 조건을 변화시키면서 각각에 대한 실험을 수행하는 것은 막대한 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 유동장에 영향을 미치는 각각의 요소를 변화시키면서 유동해석을 수행하고, 실험을 통해 몇 가지 경우에 대해서만 시뮬레이션 결과와 비교하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하는 방법으로 연구를 진행하였다.

밸브 후단의 피팅 형상에 따른 밸브 용량계수의 변화를 고찰하기 위하여 L, T, Y, 그리고 +자 형상의 피팅을 밸브 후단에 설치하였다. 각각의 형상에 대해 밸브로 유입되는 유체의 평균속도를 3, 5, 7m/s로 변화시키고, 밸브 전단 3D 지점에 입구를 위치시켰으며, 피팅의 위치를 밸브 후단의 3D, 5D, 7D로 위치하여 계산

을 수행하였다. 각각의 피팅 형상에 대해 유량과 피팅 위치의 변화를 적용하게 되면 36가지의 경우 수가 발생한다. 본 연구에서는 36가지 상황에 대해 각각 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 속도장 및 압력장을 비교하였다.

실험을 위해서는 밸브 후단 3D에 L, T, Y, +자형 피팅을 설치하였고, 밸브로 유입되는 유체의 평균유속은 밸브 레이놀즈수 $6.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ (약 3m/s) 범위 안에서 실험을 수행하였다. 밸브 내부의 유동장을 완전한 난류유동 상태로 만들기 위해 KS규격 (KS B 2101)⁽²⁾에서는 밸브 레이놀즈수를 $4.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ 범위 안에 있도록 권장하고 있다. 실험에 사용된 밸브는 글로브 타입의 제어밸브이며 배관 지름은 3/4인치이다. 밸브의 개도를 100% 개방한 상태에서 실험을 수행하였으며 사용된 유체는 상온 (20°C)의 물이다.

3.2 실험장치 구성

밸브 용량계수의 실험을 위한 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 그리고 실험에 사용된 제어밸브의 형상을 Fig. 3

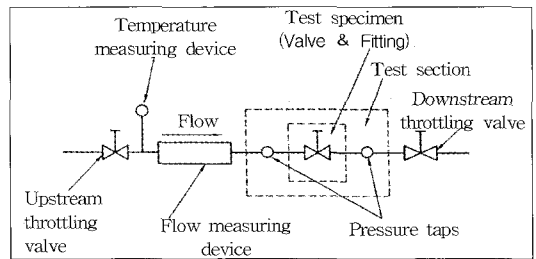


Fig. 2 Experimental apparatus

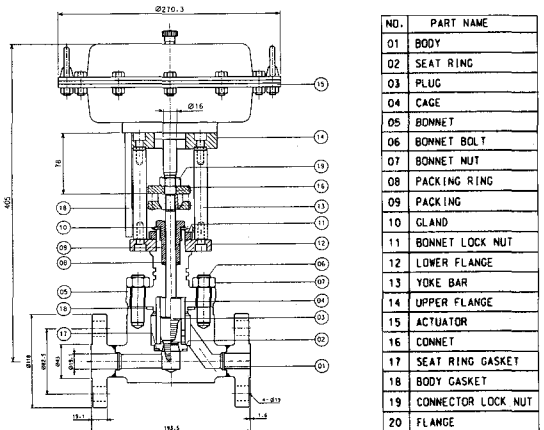


Fig. 3 Specification of a globe style control valve.

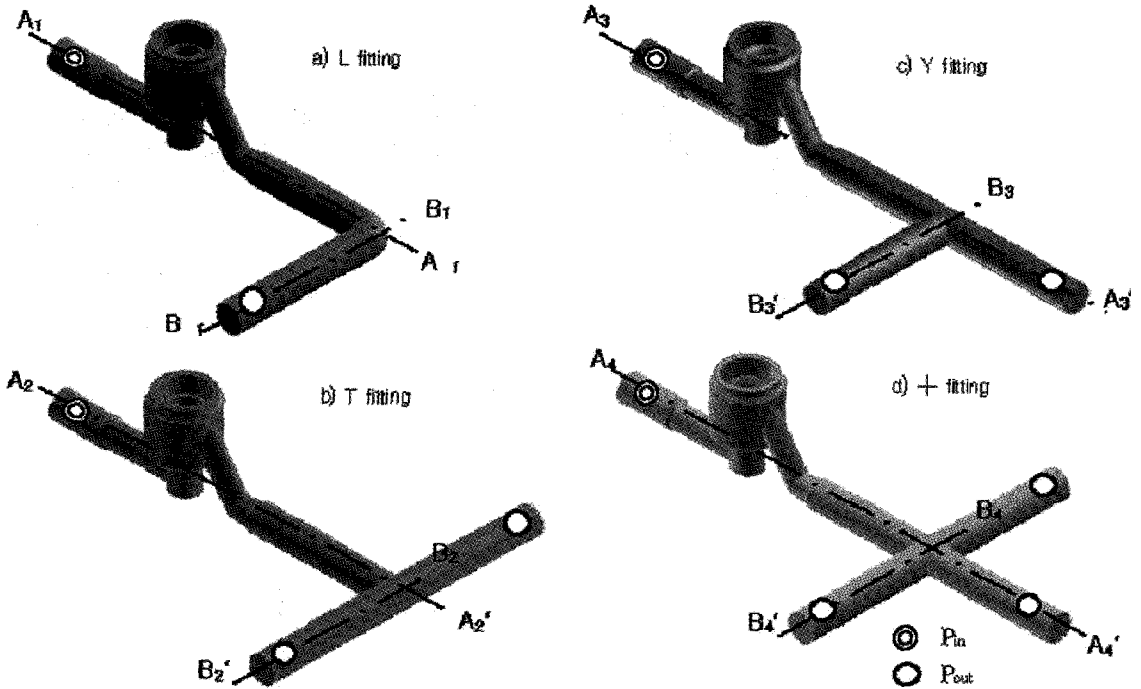


Fig. 4 Piping geometries of a control valve attached different type fittings

에 나타내었다. 실험구간 내에 제어밸브가 설치되고 밸브 전·후단에서 밸브로 유입되는 유체의 입구압력과 유출되는 출구의 압력을 측정하여 밸브를 통과하면서 발생하는 압력손실을 측정하게 된다. 시험시료 전단부에 유량측정장치를 통해 유량을 측정하고 상/하류 스스로를 밸브를 통해 유량 및 입/출구의 압력을 조절하게 된다. 유량측정 장치 및 압력 측정장치는 컴퓨터와 연결되어 이미 작성된 컴퓨터 프로그램을 통해 밸브 용량계수를 산출하게 된다.

3.3 CFD 조건

유체의 유동현상 해석을 위해 유동해석 상용 프로그램인 FLUENT[®]를 사용하여 유동장을 해석하였다. 유동이 3차원 정상상태 (steady state)이고, 작동유체가 물로서 비압축성 (incompressible) 유동이라 가정하고 계산을 수행하였다. 입구부에서는 유입되는 유량을 경계조건으로 사용하였으며, 출구부에서는 대기압 조건으로 압력을 고정하였다. Fig. 4에는 밸브 후단에 L, T, Y, +형의 피팅이 설치된 밸브 및 배관의 형상을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 밸브 후단에 직관이 설치된 경우 제어밸브 및 배관 중심 단면에서의 속도 벡터와 압력분포를 보여준다. 입구에서의 평균 유속 (U_{in})이 각각 (a) 3 m/s, (b) 5 m/s, (c) 7 m/s 일 때 속도벡터를 보면, 제어 밸브를 통과하여 나온 유체가 밸브 후단의 배관으로 유입되면서 배관의 상단부에 재순환 (recirculation) 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 유속이 증가하면서 재순환 영역의 크기가 감소하고 중심이 후류쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 유동장 내의 재순환 영역은 큰 압력 손실을 유발하며, 역압력 구배가 형성되는 구간이다. Fig. 5 및 Fig. 6의 압력분포도를 통해 이를 확인할 수 있으며, 유속이 증가하면서 재순환 영역에서의 압력손실이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 밸브를 통과하는 유량과 밸브 전후단의 압력손실이 상관관계를 가지고 있음을 나타낸다.

Fig. 7은 네 가지 피팅이 밸브 후단 3D, 5D, 7D에 각각 위치할 때 배관 중심선에서의 압력분포를 나타낸다.

밸브 후단 피팅에 따른 밸브 용량계수의 영향 평가

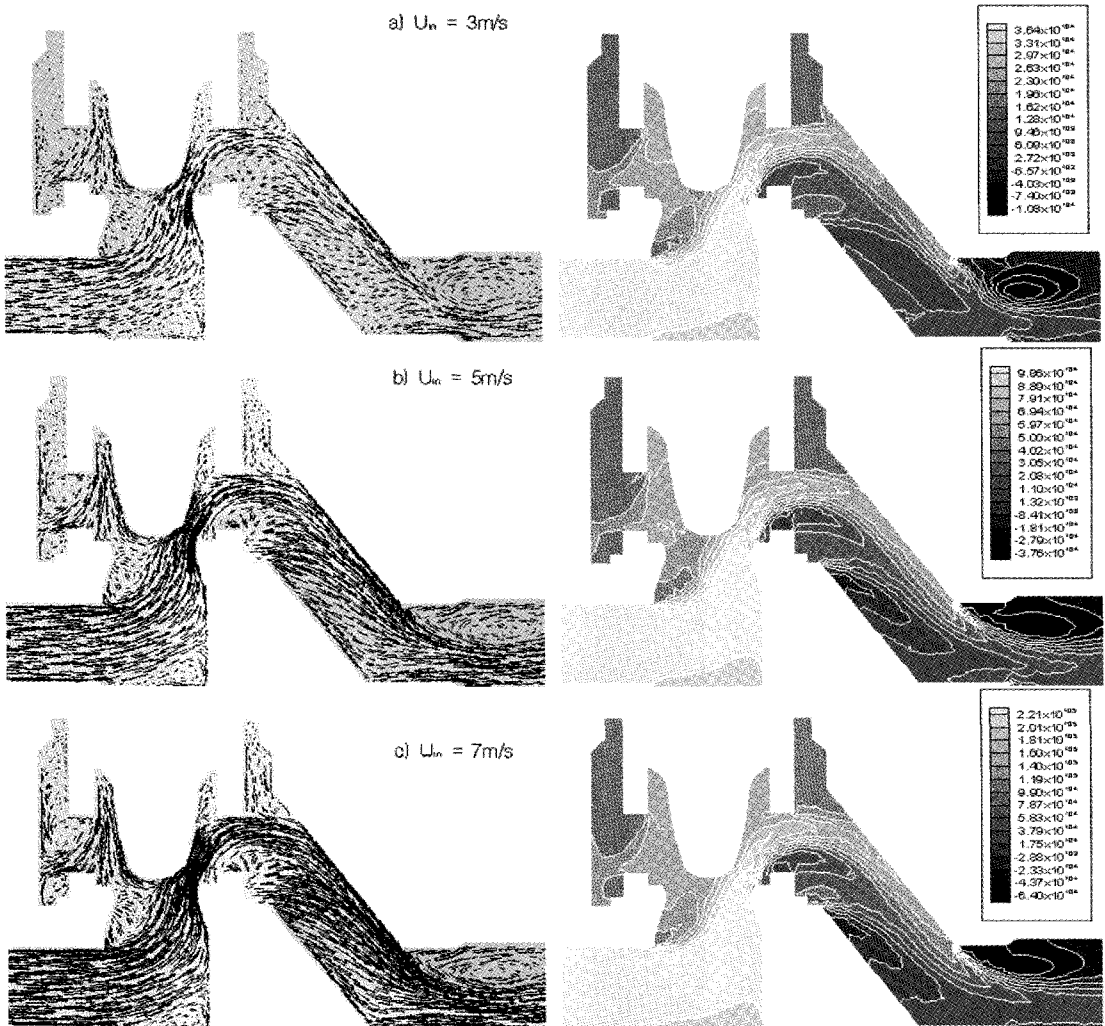


Fig. 5 Calculated velocity vectors and pressure contours at the center plane of a globe style control valve attached with a straight pipe.

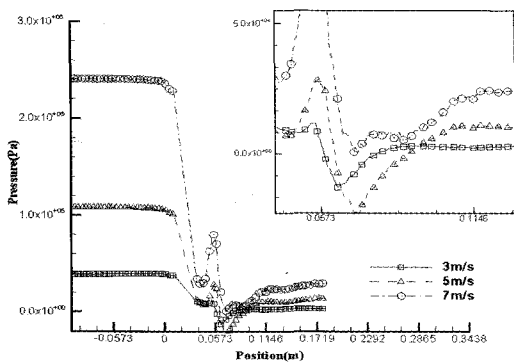


Fig. 6 Calculated pressure distributions through the pipe axis in case of straight pipe fitting

밸브를 통과하면서 큰 압력 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 피팅 지점 부근에서 최소압력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 속도장에서 관찰되었던 재순환 영역의 압력손실에서 기인한 것으로, 재순환 영역을 지나면서 서서히 압력이 회복되고 있는 것을 확인할 수 있다. 밸브로 유입되는 유체의 평균 유속이 3m/s로 저속일 경우 모든 피팅 형상에 대해서 밸브 후단의 직관이 3D 이상에서 압력이 완전히 회복되어 정상 상태에 도달하였다. 그러나 유속이 증가하면서 피팅 형상 및 직관의 길이에 따라 불안정한 분포를 보이고 있는데, 평균 유속이 7 m/s로 증가할 경우 L, T,

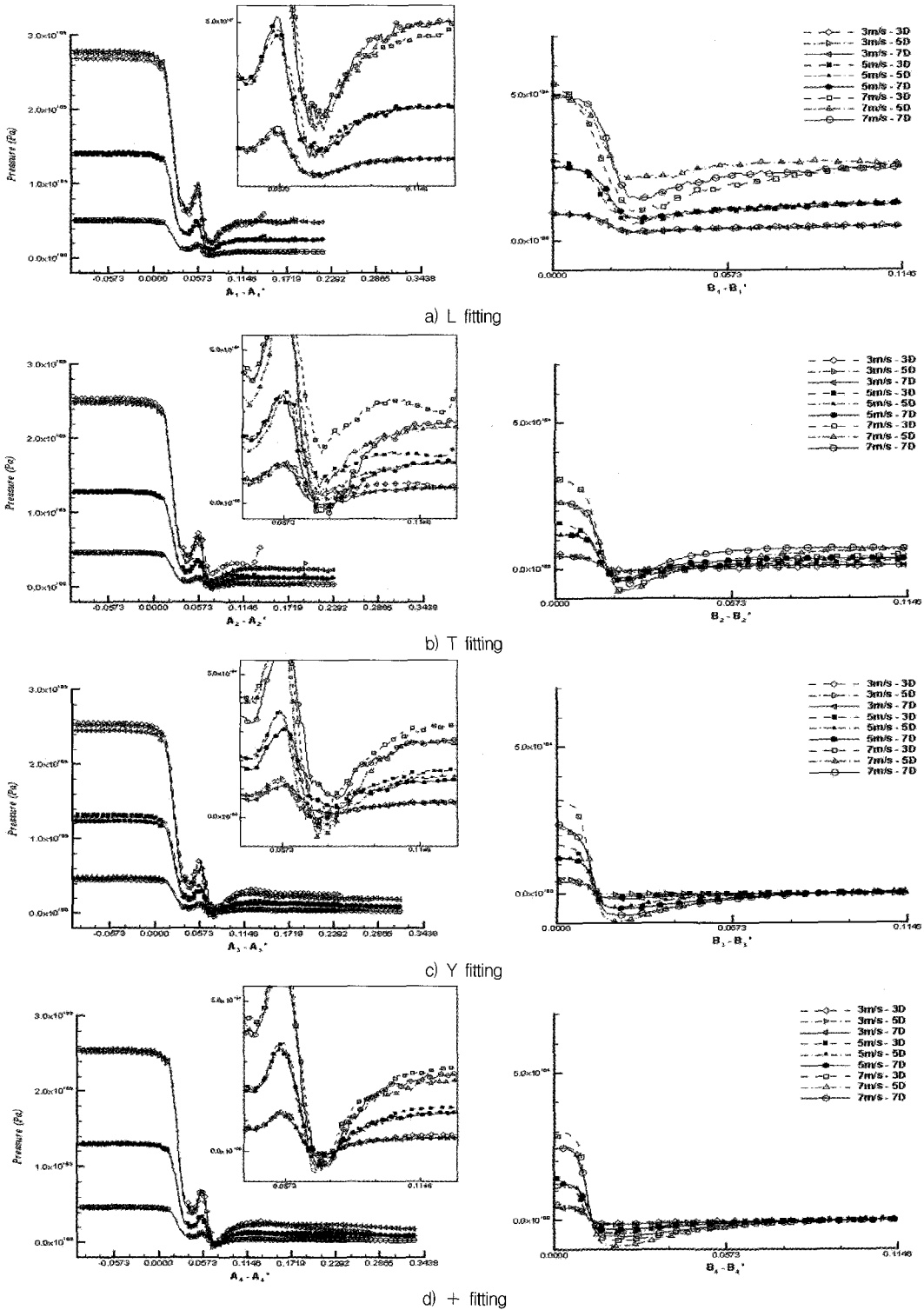


Fig. 7 Calculated pressure distributions through the pipe axis according to each fitting

밸브 후단 피팅에 따른 밸브 용량계수의 영향 평가

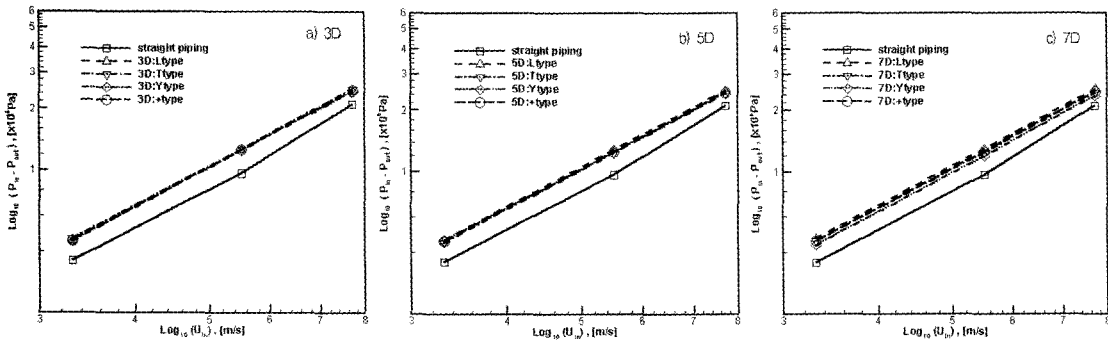


Fig. 8 The relationships between calculated pressure drops and flow rates for the globe style control valve.

Y자형 피팅에서 밸브 후단의 직관 길이가 3D일 때 압력이 완전히 회복되지 못하고 불안정한 분포를 보이고 있다. 이는 유속이 증가하면서 재순환 영역의 중심이 후류 쪽으로 이동하여 이에 대한 영향으로 압력분포가 불안정하게 나타나는 것으로 분석된다. 그러나 5D 이상에서는 T자형 피팅일 경우를 제외하면 비교적 안정된 압력분포를 보이고 있다. 7D 이상의 직관이 확보된 상태에서는 모든 피팅에 대해서 압력회복이 안정된 상태에 도달하는 것이 확인되었다. 그러므로 밸브 설치 시 밸브 후단에 최소한 5D의 직관부가 확보되면 밸브 성능의 변화는 없는 것으로 판단되며, 여러 가지 복잡한 유동현상을 고려하여 7D까지 확보하는 것을 권장하는 바이다. 기존의 국제규격⁽¹⁾에서는 7D이상의 직관부를 확보하도록 정하고 있고, KS규격 (KS B 2101)⁽²⁾에서는 밸브 후단에 10D의 직관부를 확보하도록 권장하고 있다.

Fig. 8은 유량변화에 따른 압력강하 결과를 피팅 위치에 따라 도시하였다. L, T, Y, +자형 피팅이 배관에 설치될 경우 직관이 설치되었을 때보다 압력손실이 약 10% 크게 나타나고 있다. 이러한 차압의 증가는 밸브의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하며, 밸브 용량계수의 감소를 초래한다. 따라서 밸브 후단에 직관이 아닌 다른 형태의 배관이 설치될 경우 밸브 용량계수의 수정이 불가피하다. 반면 피팅 형상에 의한 변화는 무시할 수 있을 정도로 작게 나타나고 있다. 그리고 피팅 위치가 3D, 5D, 7D로 변하더라도 차압의 변화는 크게 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 실험결과

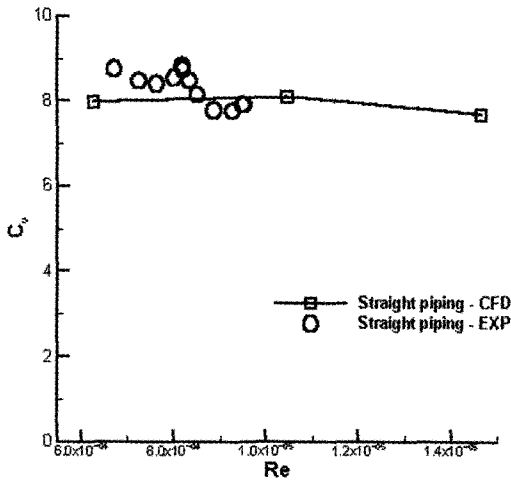
Fig. 9의 (a)는 밸브 후단에 직관이 설치된 경우에 대한 실험결과이다. 이 경우 측정된 밸브 용량계수

(C_v)의 값은 8.30이다. (b)는 L자형 피팅이 설치된 경우로서 이때 측정된 밸브 용량계수의 값은 5.72이다. (c)는 T자형 피팅이 설치된 경우로서 측정된 밸브 용량계수는 5.87이다. (d)는 Y자형 피팅이 설치된 경우로서 5.82의 밸브 용량계수가 측정되었다. (e)는 +자형 피팅이 설치된 경우로서 5.92의 밸브 용량계수가 측정되었다. 실험 결과를 통해 볼 때 밸브 후단에 피팅이 설치되는 경우 직관이 설치되는 경우에 비해 밸브 용량계수가 약 30% 정도 감소하는 것으로 판명되었다.

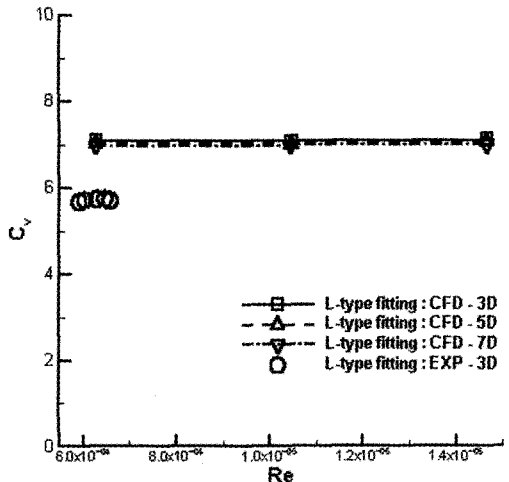
배관 형상계수는 배관의 형상이 밸브 용량에 미치는 영향을 나타내는 수로서, 각 피팅에 대한 배관 형상 계수 (F_p)는 L자형의 경우 0.69, T자형 0.71, Y자형 0.70 그리고 +자형 0.71의 값을 갖는 것으로 나타났다. 평균 약 0.7 정도로서 밸브 후단에 L, T, Y, +자형의 피팅이 설치될 때 밸브 용량계수 값이 30% 정도 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 피팅의 형태에 따라서는 배관 형상 계수의 변화가 거의 무시할 수 있을 정도로 작게 나타나고 있다. 따라서 밸브 후단에 피팅이 설치 될 경우 밸브 성능의 변화가 불가피하지만, 피팅의 형상에는 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교해 보면, 밸브 후단에 직관이 설치되는 경우에는 두 가지 경우 용량계수 값이 5%이내의 오차를 보이고 있다. 그러나 L, T, Y, +자형의 피팅이 설치되는 경우 컴퓨터 계산 결과가 20~25% 정도 크게 예측하고 있는데, 결국 컴퓨터 시뮬레이션 결과보다 실험결과가 더 많은 손실조건이 존재한다는 것을 의미한다. 이는 컴퓨터 시뮬레이션의 경우 아주 이상적인 상태의 유동을 가정하고 계산을 수행하였기 때문으로 사료된다.

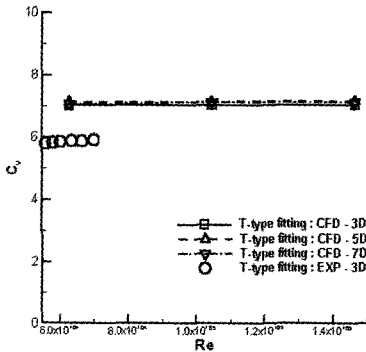
CFD 계산 조건으로는 이상적인 균일한 유동이 입구로 들어오지만, 실험에서는 밸브 유입부의 직관부



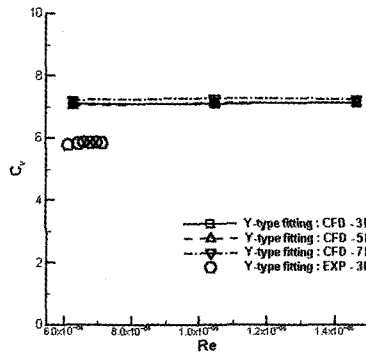
(a) Flow coefficient for the valve attached with a straight pipe



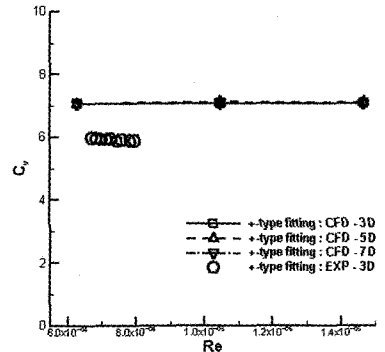
(b) Flow coefficient for the valve attached L-type fitting



(c) Flow coefficient for the valve attached T-type fitting.



(d) Flow coefficient for the valve attached Y-type fitting.



(e) Flow coefficient for the valve attached +-type fitting.

Fig. 9 Comparisons between computed and measured flow coefficients, when valve is opened 100%.

길이 가 짧고 계산 조건의 유속분포와 많이 다르게 되어 어느 정도 오차는 감수할 수밖에 없다. 또한, 배관의 이음매가 매끄러워야 하지만 충분히 이를 만족시키지 못하고 피팅부의 표면 조도에 의한 영향, 용접 상태 등 부가적인 관로 손실이 발생할 수 있다. 또한 CFD 결과에서는 유속이 3 m/s 정도 일 때 밸브 후단 3D에서 유동이 정상상태에 도달하는 것으로 예측되었으나 실험에서는 3D의 직관부로는 유동이 정상상태에 도달하기에 부족하다고 판단된다. 실제 유동에서 밸브에 의한 압력 손실이 완전히 회복되기 위해서는 적어도 7D 이상의 직관부가 확보되는 것이 바람직한 것으로 추정된다.

마지막으로 아직 유동해석 시뮬레이션 기술이 3차원 난류 유동장 해석 등에서 실제 유동현상을 100% 예측 못하는 실정이다. 많은 연구결과에 의하면 시뮬

레이션 결과가 실험 결과에 비하여 30% 정도 오차가 나오면 시뮬레이션 결과가 어느 정도 성공적이라 평가 받고 있다. 이러한 점을 고려할 때 본 시뮬레이션 결과가 실험치와 비교하여 일관적인 오차를 보이므로 이러한 오차는 보정계수 등을 도입하여 줄일 수 있을 것으로 판단되는데, 이를 위하여 좀 더 많은 실험 결과 자료와 비교해석이 요구된다.

5. 결론

밸브 후단에 피팅이 설치될 경우 밸브 용량 계수의 변화에 대한 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 밸브 후단에 피팅이 설치되는 경우 피팅으로 인한

여 추가적인 압력 손실이 발생하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 피팅이 설치되는 경우 직관의 경우에 비해 약 10% 정도 밸브 전·후단의 차압이 증가하는 것으로 관찰되었다. 그러나 밸브의 개도가 100% 열린 상태에서 측정된 실험 결과와 비교해서는 최대 25% 정도 용량계수 값을 크게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 현재 시뮬레이션 기술의 한계범위 내에 드는 오차로 볼 수 있으며, 주목할 만한 것은 피팅 별로 일관된 오차를 보이고 있기 때문에 좀 더 많은 실험 자료와 비교한다면, 보정계수 등을 도입하여 예측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

- 2) 각각의 피팅을 밸브 후단에 설치한 상태에서 밸브의 용량계수를 실험을 통해 측정된 결과 피팅이 없을 때보다 30% 정도 용량계수가 감소하였다. 이는 밸브 후단의 피팅이 밸브 용량계수에 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 피팅의 형태에 따라서는 밸브용량계수가 5% 이내의 범위에서 변하고 있으므로 피팅의 형상에 대해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.
- 3) 배관의 형상에 의한 영향을 평가하는 배관 형상계수는 피팅이 설치될 경우 약 0.7의 값을 나타내었다.
- 4) 피팅의 설치 위치에 대해서는 밸브에서의 압력손실이 밸브 후단 5D 지점에서 완전히 회복되어 정상상태를 유지하는 것으로 관찰되어 5D 이상이면 적합할 것으로 사료된다. 그러나 이것은 이상적인 조건

의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과이므로 실제 실험에서는 배관 이음매 및 피팅 접합부의 용접상태 등에 의한 유동교란, 배관 표면의 상태 등에 의해 유동장이 영향을 받게 되므로 최소 7D 이상의 직관부를 확보하는 것을 권장한다.

참고문헌

- (1) IEC 60534-2-3, Industrial-process control valves: Flow capacity-Test procedures, Second edition, 1997-12
- (2) KS B 2101, 밸브의 용량계수 시험 방법, 1999
- (3) Davis, J. A., and Stewart, M. B., 2002, "Predicting Globe Control Valve Performance-Part I: CFD Modeling," ASME J. Fluids Eng., Vol. 118, pp. 562-568.
- (4) Davis, J. A., and Stewart, M. B., 2002, "Predicting Globe Control Valve Performance-Part II: Experimental Validation," ASME J. Fluids Eng., Vol. 124, pp. 778-783.
- (5) Lee, J. J., and Wellford, L. C., 1997, "Transient Fluid-Structure Interaction in a Control Valve," ASME J. Fluids Eng., Vol. 119, pp. 354-359.
- (6) 윤준용의 5인 공역, 1999, 유체역학, 淸文閣
- (7) Hinze, J. O., 1975, Turbulence, McGraw-Hill, Inc.
- (8) FLUENT, 1998, User's Guide, Fluent Inc.